

海象観測システムによる有明海浅海域の波浪解析

I. 表面波形特性について

藤 本 昌 宣・渡 辺 潔

(干拓水工学研究室)

昭和59年5月8日受理

Analysis of Ocean Waves in the Shallow Area of the Ariake Sea by Oceanographic Observation System

I. On the characteristics of the wave profile

Masanobu FUJIMOTO and Kiyoshi WATANABE

(Laboratory of Shore Reclamation and Hydraulic Engineering)

Received May 8, 1984

Summary

The wave profiles were analyzed statistically from the data of ocean waves which were obtained by the observational apparatus of oceanic phenomena in the Ariake Sea and the characteristics of these variation in the shallow area were examined.

The following results were obtained.

1) The frequency distribution of the wave profiles is fairly approximated by a normal distribution. The mean values and standard deviations of these skewness C_s and kurtosis C_k are as follows

$$C_s = 0.280 \pm 0.098, \quad C_k = 3.184 \pm 0.309.$$

And the relation between C_s and C_k is expressed as

$$C_k = 2.141 C_s + 2.585 \quad (\gamma = 0.680).$$

2) By spectrum analyses of ocean waves, the maximum value of spectral density curve increases and moves to lower frequency side, as the wind velocity or water depth increases. In higher ranges beyond the excellent frequency, the mean value of $\beta' = \phi_{\omega} f^5 / g^2$ is 5.07×10^{-6} . Furthermore, in lower ranges of frequency, the following relationship exists.

$$\log (\phi_{\omega} f^5 / g^2) = -13.07 + 7.52 (gF / U_*^2)^{0.321} (U_* f / g)$$

1. 緒 言

海面に存在する波の表面波形(水位変動)は時間的にも空間的にも非常に不規則な変動を示す。このような不規則な波の変動特性を明らかにするためには、一連の波形変動から求められる波高および周期を統計的に処理し、平均波や有義波などの代表波によって表現する方法や、

波形のスペクトル解析から得られるスペクトル密度や周波数特性によって表現する方法などがある。

本文は、有明海灣奥部の一定点に設置した佐賀大学有明海海象観測塔（以後「観測塔」と略称）に取付けた波浪計によって得られた水位変動を解析し、浅海域における表面波形の度数分布特性と周波数スペクトル特性について検討したものである。

2. 観 測 地 点

観測塔は、図-1に示すように有明海灣奥部の佐賀県川副町国造干拓地先5 kmの東経 $130^{\circ}16'42''141$ 、北緯 $33^{\circ}5'52''562$ 地点に設置されている。この地点は海苔漁場の先端部に位置し、平均水深6 mの浅海域である。

観測塔の構造は、図-2のように海底からの高さ13 m、周囲 5×5 mの鋼管構造で、鉄塔上部には観測室（海上観測局）を設置している。

3. 波形の観測方法

海面の水位変動（以後「波形」と略称）は図-2に示すように、観測塔の側面に鉛直に張られた約10 mの抵抗線型の波浪検出器によって、測定時ごとに、サンプリング間隔0.44秒、観測時間約18分間で計2,500個測定される。また、この波形信号は、波高周期変換器によって連続的に順次、波高と周期に変換される。

このようにして海上で得られた波形、波高および周期は他の観測データとともに、伝送フォーマットにしたがってテレメータによって大学の受信局（陸上監視局）へ送信される。なお、波形の観測範囲は0～10 mであり、これを2進数8ビット構成で観測、伝送するために、その分



図-1 有明海海象観測塔位置図

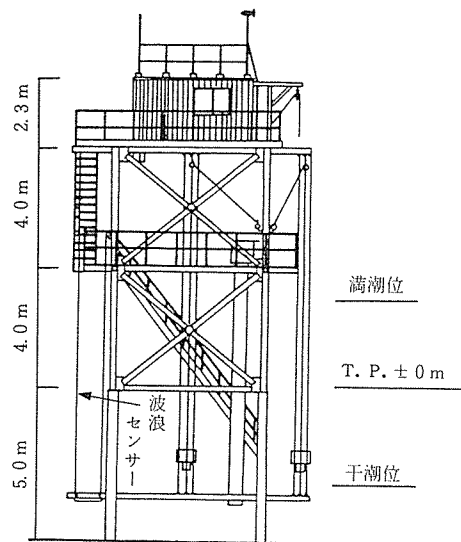


図-2 観測塔概略図

解能は $10/256=0.039(\text{m})=3.9(\text{cm})$ である。さらに、観測された波形の値は、検出器の下端部付近を基準(0 m)とした値であり、また、その変動は潮位の影響が加算されたものとなっている。したがって、潮位の影響を除去して、純粋に波形変動のみを取り出し、かつその平均値をゼロとするために、1観測で得られる2,500個のデータ(解析には2,000個使用)を200個ごとに算術平均し、この平均値からの偏差を以下の解析に使用する波形データとした。

4. 波形の経時変化

3. で述べたような処理を施した表面波形 η の経時変化を(a)60秒間(データ数136)と(b)880秒間(データ数2000)の2つの例で図-3(a), (b)に示す。観測時における海象, 気象状況は(a)水深7.7m, 風速9.4m/sec, 風向W, (b)水深5.2m, 風速10.6m/sec, 風向SEであった。さらに、 η の自己相関係数を(b)を含めた2つの例で図-4に示す。これは、ずらしの間隔0.44sec, ずらしの数200で計算したものであるが、これらの結果から、浅海域における η はほぼ3秒前後の周期性がみられるものの、時系列的に非常に再現性の低い不規則な変動を示していることが認められる。

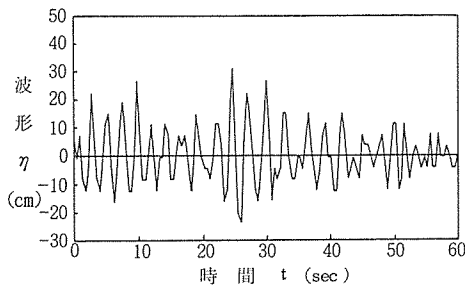


図-3(a) 波形の経時変化
(1983年11月30日11時)

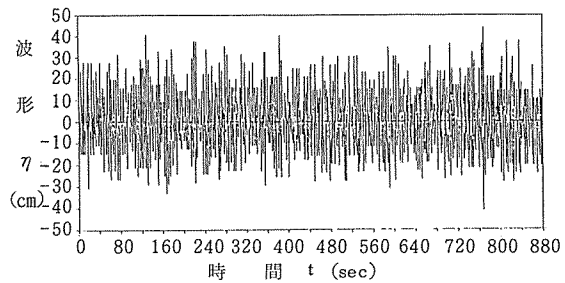


図-3(b) 波形の経時変化
(1981年6月22日17時)

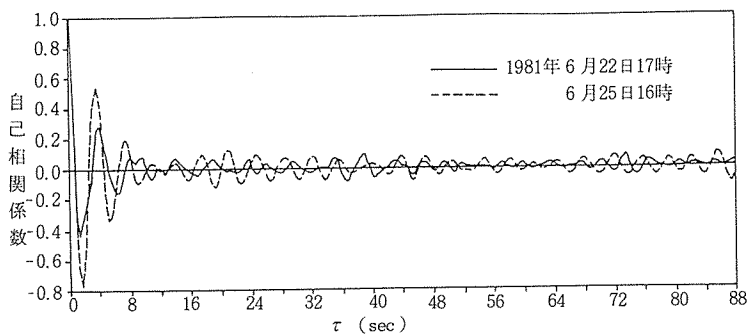


図-4 波形の自己相関係数

5. 波形の度数分布

波形は現象としては連続的に変化するアナログ量であるが、本装置によって得られる値は0.44secのサンプリング間隔で読み取られた離散的な量である。

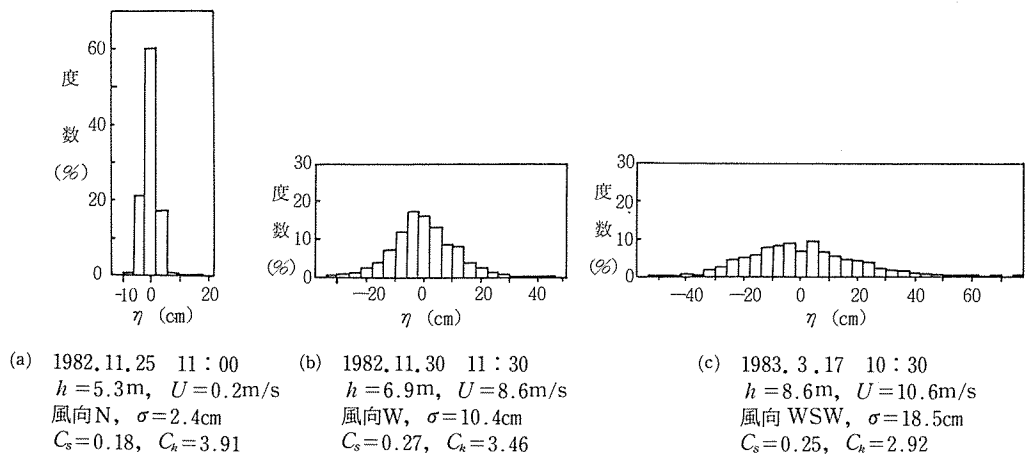


図-5 波形の度数分布

このような波形 η の値の出現頻度について検討するために、 η の区間幅を測定値の分解能にひとしい 4cm とした度数分布図を作成した。図-5は、気象状態の異なる3つの時間帯についての η の度数分布、水深 h 、風速 U 、風向ならびに分布の特性値である標準偏差 σ 、ひずみ度 C_s および尖鋭度 C_k を示したものである。これらによると、風速が大きくなると σ も大きくなり、このために度数分布は山が低く、裾の広い曲線となることが分かる。また、このような度数分布曲線の正規分布への適合度を明らかにするために、例として2つの時間帯における度数分布と、これらの平均値 (= 0) および σ を用いて計算した正規分布曲線をあわせて図-6に示す。これらの度数分布は正規分布に近い形状を示していることが認められる。また、一般的にも解析の都合上、正規分布にしたがうと仮定することが多い²⁾。しかし、 χ^2 検定によって適合度を検討すると、厳密には正規分布とみなせず、棄却される場合がほとんどである。これら2つの例では、 C_s が(a)0.27, (b)0.06, C_k が(a)3.09, (b)2.97であり、正規分布に対してややひずん

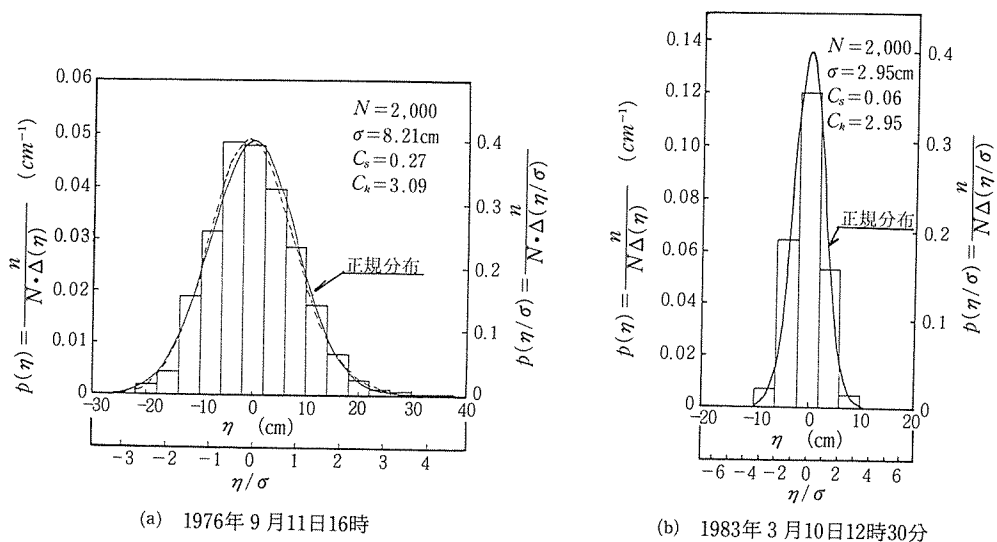


図-6 波形の相対度数分布

だ分布を示している。このような正規分布からのずれは、波の有限振幅性によるといわれており⁵⁾、図-6(a)の点線で示すように、正規分布を C_s と C_k の値によって補正した Gram-Charlier の分布^{4),5)} でより近似させることができる。

次に、このような分布の特性値である σ および非線型性を示す指標としての C_s ならびに C_k について考察する。 σ 、 C_s および C_k は次のような式で表わされる²⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^2 \right]^{1/2} \\ C_s &= \frac{1}{\sigma^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^3 \\ C_k &= \frac{1}{\sigma^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 σ ：波形の標準偏差、 C_s ：ひずみ度、 C_k ：尖鋭度、 N ：サンプル数、 $\bar{\eta}$ ：波形データの平均値

σ については、波高が大きい場合ほど大きい。つまり、一連の観測における η の最大、最小の幅 $\Delta\eta_{\max}$ が大きい場合ほど度数分布の裾の広い形となる。図-7は、 $\Delta\eta_{\max}$ と σ の関係を1976年7月から1984年3月までの比較的風波の高い時間帯に集録した191例について示したものである。この結果、 σ と $\Delta\eta_{\max}$ の関係は、

$$\sigma = 0.137\Delta\eta_{\max} + 0.006 \quad (\text{単位：m}) \quad (2)$$

(相関係数 $\gamma=0.975$)

で表わされ、相関性の高い直線で近似される。

また、 C_s と C_k については、正規分布の場合は $C_s=0$ 、 $C_k=3$ となるが、 $C_s>0$ となると分布のピークが平均値よりも小さい方へ寄って、分布曲線が η の大きい値の方へ長く裾をひく形となる。一般に、海の波はほとんど $C_s>0$ となる。また、正規分布よりもピークが高くなると、 $C_k>3$ となる。このような値を観測塔において得られた191例の波形分布曲線から求めると、 $C_s=0.280\pm0.098$ (平均値 \pm 標準偏差)、 $C_k=3.184\pm0.309$ となる。一方、合田ら³⁾が名古屋港で観測した波浪データから求めたこれらの値は $C_s=0.325\pm0.211$ 、 $C_k=3.737\pm0.671$ である。これらを比較すると、観測塔における波形の方がより正規分布に近いといえる。このような指標のうち C_s について、合田ら³⁾は次のように報告している。1) C_s に最も関係の大きい統計量は相対波高 $H_{1/3}/h$

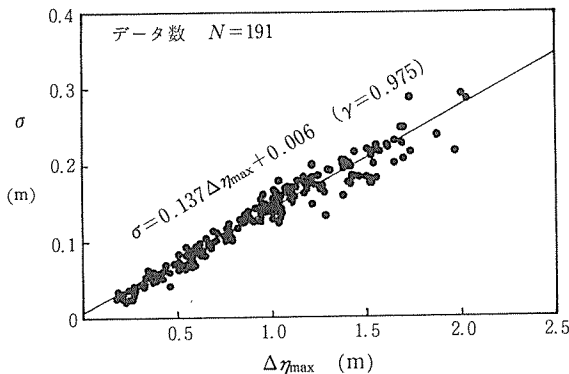


図-7 波形の最大、最小値の差 $\Delta\eta_{\max}$ と標準偏差 σ の関係

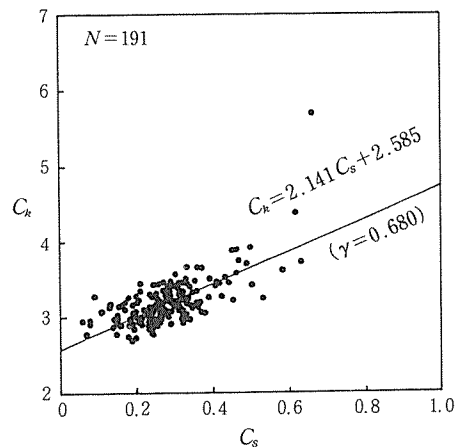


図-8 波形度数分布におけるひずみ度 C_s と尖鋭度 C_k の関係

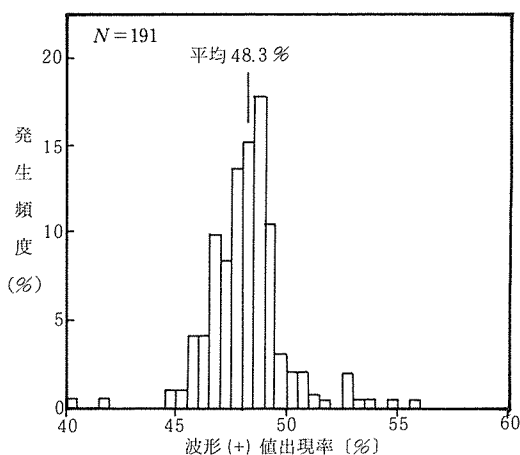


図-9 一連の波形データ (2000個) における (+) 値の出現率とその発生頻度

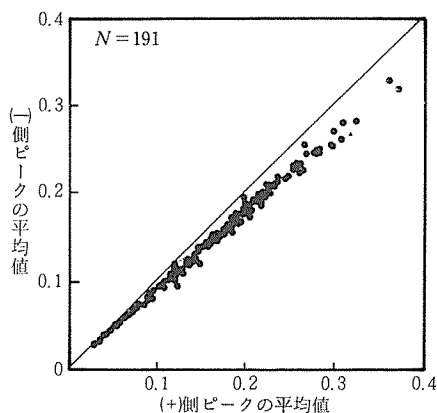


図-10 波形変動における (+) 側ピークの平均値と (-) 側ピークの平均値の比較

($H_{1/3}$: 有義波高, h : 水深) である. 2) C_s の大きいものは C_k も大きい傾向がみられる. これらを観測塔の191例についてみると, C_s と $H_{1/3} / h$ の間にはほとんど相関はみられない ($\gamma = 0.035$). また, C_s と C_k の間には図-8に示すように正の相関がみられ, 次のような関係式が得られる.

$$C_k = 2.141 C_s + 2.585 \quad (\gamma = 0.680) \quad (3)$$

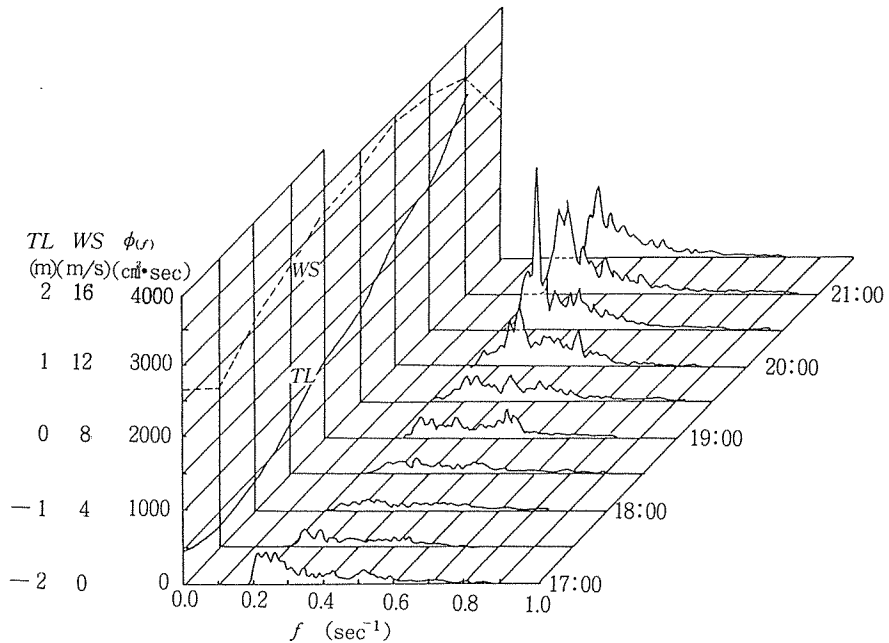
さらに, 一連の波形データ (2,000個) において, 平均値 (= 0) を中心として, これより大きい (+) 値とこれ以下の (-) 値の出現する比率を比較するために, (+) 値の出現率とその発生頻度を示したのが図-9である. この結果, (+) 値の出現率は平均48.3%であり, したがって (-) 値のそれは51.7%となり, (-) 値の方の出現数がやや多いことがわかる. また, 波形データの平均値は0であるが, (+) 側と (-) 側の波形のピーク値をそれぞれについて平均し, これらの値を比較すると図-10のようになる. これによれば, 全体的には (+) 側のピーク平均値の方が1割程度高い値を示す. これらのことから, 波形度数分布のピークが平均値よりやや小さい値の方へ移り, η の大きい方へ長く裾をひく形をとることが明らかである.

6. 波形の周波数スペクトル

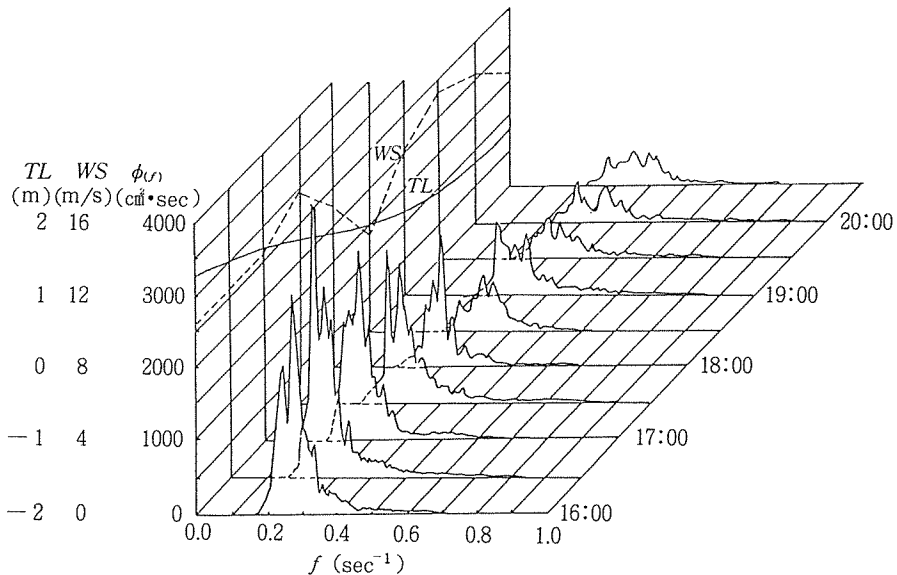
表面波形の変動特性をスペクトルの面から明らかにするために, Blackman-Tukey 法を用いて, データ数2000, ずらしの数200として, 波形の周波数スペクトルを求めた. これによって, 風波の発達にともなうスペクトル密度曲線の変化について検討した. さらに, 密度曲線の高周波側ならびに低周波側におけるそれぞれの曲線形の特性を光易^{7),8)}の手法によって解析し, 博多湾における結果と比較するとともに, 有明海浅海域への適用を試みた.

6. 1 波形スペクトルの経時変化

図-11は, 観測塔において得られた波形データより求めたスペクトル密度曲線の30分ごとの変化を, 潮位 TL , 風速 WS とともに示したものである. このうち(a)は風波の発達過程にお



(a) 1981年6月22日



(b) 1981年6月25日

図-11 波形の周波数スペクトルの経時変化

けるものであり、(b)は減衰していく過程におけるものである。有明海浅海域においても、風波の発達にともなって、曲線のピークより低周波側にエネルギーが蓄積され、スペクトルのピークが低周波側へ移行し、全スペクトルエネルギー（曲線の面積）が増大する傾向がみられる。このような特性をよりはっきりみるために、スペクトルのピーク値 $\phi(f)_m$ と、これに対応する周波数 f_m 、および全スペクトルエネルギー E の経時変化の一例を風速 WS 、吹送距離 F 、潮位

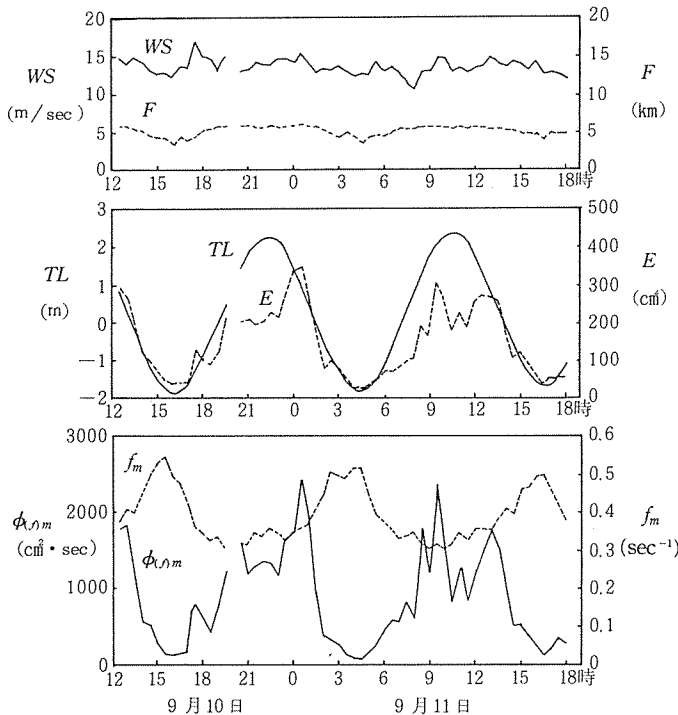


図-12 波形のスペクトル特性値の変化 (1976年)

TLとともに図-12に示す。この例は、WSやFよりも内湾特有の大きい潮位変動の影響を強調している。すなわち、スペクトル密度曲線における $\phi_{(f)m}$ 、 f_m 、 E は総体的にはこの潮位変動とともに大きく変化し、潮位の上昇につれて $\phi_{(f)m}$ 、 E は増加し、逆に f_m は減少している。図では、さらにこれにWSの影響が重畳された形となっている。

6. 2 高周波側スペクトル

Phillipsは、 f_m より高周波側の周波数スペクトル $\phi_{(\omega)}$ を

$$\phi_{(\omega)} = \beta g^2 \omega^{-5} \quad (4)$$

で示した⁸⁾。ここに、 g ：重力加速度、 ω ：角周波数、 β ：無次元数である。さらに、 β の値についてPhillipsは、 1.48×10^{-2} や 1.17×10^{-2} などを提案した。また、光易⁷⁾は β の値が普遍定数ではなく、吹送距

離 F と風の摩擦速度 U_* から求めた無次元吹送距離 gF/U_*^2 の増大とともに減少するとして、

$$\beta = [21.0 \log (gF/U_*^2) - 34.5]^{-1} \quad (5)$$

を与えた。ここで、 $\omega = 2\pi f$ の関係より、式(4)の ω を f に変換して、

$$\phi_{(f)} = \beta' g^2 f^{-5} \quad (6)$$

で表わすと、上に述べた β に対応する β' の値は、それぞれ 9.50×10^{-6} 、 7.51×10^{-6} となり、また、式(5)は次のようになる。

$$\beta' = (2\pi)^{-4} [21.0 \log (gF/U_*^2) - 34.5]^{-1} \quad (7)$$

このような観点から、浅海域における波形変動から β' の値を検討するために、6.1で示したようなスペクトル曲線の f と $\phi_{(f)}$ を両対数座標で表示したものの例を図-13に示す。また、式(6)を変形して $\beta' = \phi_{(f)} f^5 / g^2$ とし、低周波側も合わせて $\log (\phi_{(f)} f^5 / g^2)$ を $U_* f / g$ との関係を示したものが図-14である。これは、光易⁸⁾によるスペクトルの無次元表示にしたがったものである。図-13によれば、高周波側でのスペクトル曲線は総体的には f^{-5} 則によく適合しているが、図-14に示すように、1観測における個々の β' の値は周波数の増加とともにかなり振動することが認められる。したがって、ここでは連続した2,000個の波形データから計算したスペクトル値の $f \geq f_m$ における $\phi_{(f)} f^5 / g^2$ の平均値を β' とした。このようにして求めた β' を水深別に平均すると次表のような値を示した。 β' の全平均値は 5.07×10^{-6} となるが、これはPhillips

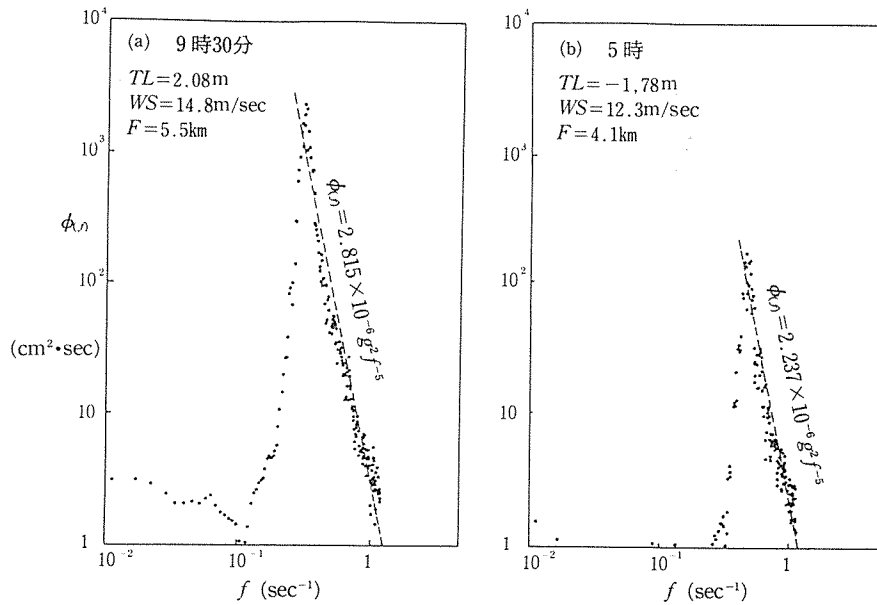
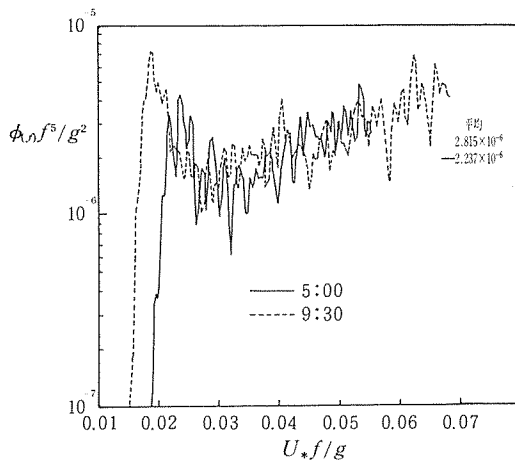


図-13 風波のスペクトル (1976年9月11日)

図-14 風波スペクトルの無次元表示
(1976年9月11日)

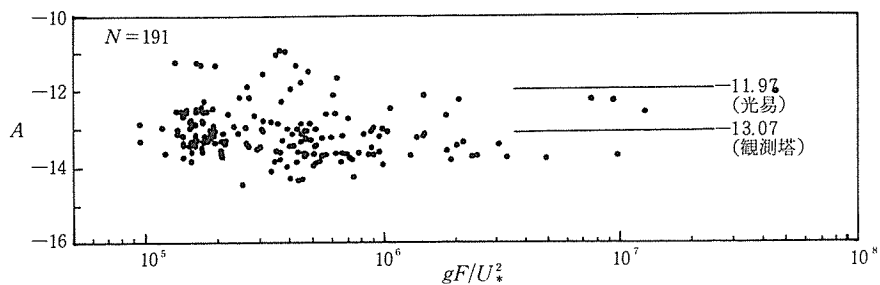
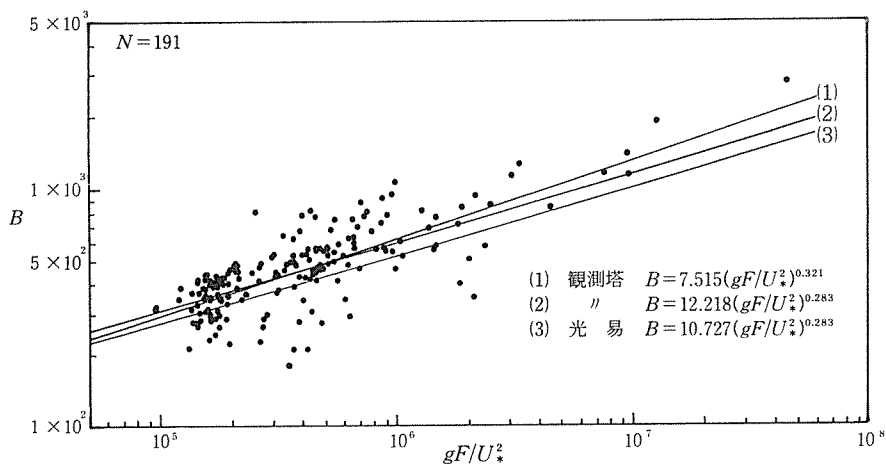
の示した 9.50×10^{-6} や 7.51×10^{-6} と比較するといく分小さい値を示している。さらに、水深の変化による β' の挙動は一定の傾向がみられないが、ほとんど大差なく、スペクトル密度曲線の高周波側ではその線型がほぼ一定であることを示している。

水深 h (m)	データ数	β'
4 ~ 5	25	5.37×10^{-6}
5 ~ 6	41	3.99×10^{-6}
6 ~ 7	43	4.89×10^{-6}
7 ~ 8	41	5.88×10^{-6}
8 ~ 9	37	4.96×10^{-6}
4 ~ 9	187	5.07×10^{-6}

6. 3 低周波側スペクトル

光易⁸⁾は、前述の図-14に示すように、周波数に対するスペクトルの変化を無次元量である $U_* f/g$ と $\log(\phi_n f^5/g^2)$ の関係で図示した結果、低周波側においては、これらの関係が

$$\left. \begin{aligned} \log(\phi_n \omega^5/g^2) &= a + b(U_* \omega/g) \\ \log b &= c + d \log(gF/U_*^2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

図-15 gF/U_*^2 と A の関係図-16 gF/U_*^2 と B の関係

で表わされるとしている。さらに、式(8)の a , b と無次元吹送距離 gF/U_*^2 との関係を検討した結果、次のような式を得ている。

$$a = -8.78, \quad b = 1.78 (gF/U_*^2)^{0.283} \quad (9)$$

また、式(8)における ω を f で表示すると

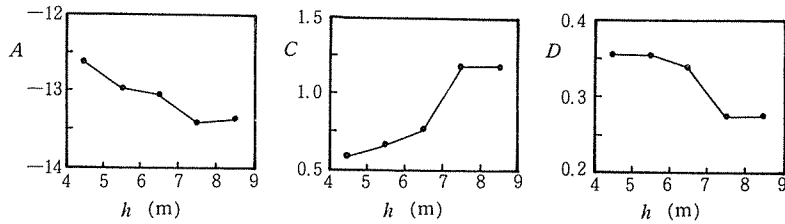
$$\left. \begin{aligned} \log(\phi_{cf} f^5 / g^2) &= A + B(U_* f / g) \\ \log B &= C + D \log(gF/U_*^2) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

となり、式(9)における a , b は次のような A , B に変換される。

$$A = -11.97, \quad B = 10.73 (gF/U_*^2)^{0.283} \quad (11)$$

そこで、有明海浅海域において得られた低周波側の波形スペクトルのデータを以上のような手法によって解析し、比較検討を試みた。

図-14に示す2つの例についてみると、低周波側においては $U_* f / g$ と $\log(\phi_{cf} f^5 / g^2)$ はほとんど直線関係にあることが認められ、式(10)で示すことが可能である。図-15, 16は191例における A , B の値を gF/U_*^2 との関係で示したものである。この結果、 A の全平均値は -13.07 とな

図-17 水深 h と係数 A , C , D の関係

り、式(11)に示す光易の値 -11.97 よりやや小さい値を示すが、その大部分は $-14 \sim -12$ に集中し、ほぼ一定値をとる。また、 B の値に対しては

$$B = 7.515 (gF/U_*^2)^{0.321} \quad (12)$$

なる関係が得られる。データ数が比較的少ないことを考慮して、式(12)の 0.321 を式(11)における 0.283 に固定すると

$$B = 12.218 (gF/U_*^2)^{0.283} \quad (13)$$

となる。いずれにしても、観測範囲である $gF/U_*^2 = 10^5 \sim 10^7$ では光易の示した値とほぼ同様な値を示すことが確認された。

さらに、観測塔が浅海域にあることから、これら A , B に与える水深の影響を検討した。水深を 1 m ごとの区間に分け、各区間ごとに式(10)の係数 A と C , D (B のファクター) を求めたものが図-17である。これによれば、 A と D は水深の増加によって大きくなり、逆に C は減少している。しかし、水深が 7 m 以上になると、これらの係数は変動が小さくなり、安定した値を示す傾向がみられる。

なお、無次元吹送距離 gF/U_*^2 を求める場合の風の吹送距離 F および摩擦速度 U_* は、それぞれ次のように考えた。

吹送距離については、その時の風向に対応する対岸距離にひとしいとし、また、潮位の低下により干潟が露出する場合は、観測塔と風上方向の水際線までの距離とした。水面上 10 m の高さにおける風速 U_{10} および摩擦速度 U_* は、鉛直方向の風速分布式¹⁾ および海面に作用する風のせん断力式¹⁾ において Kàrmàn 定数 $= 0.4$ 、海面の抵抗係数 $= 1.6 \times 10^{-3}$ ⁶⁾ とし、また、観測塔に取付けられた風速計 (風速 WS) の標高 ($+12\text{ m}$) と潮位 TL を考慮して、次式をみちびき、これによって計算した。

$$U_{10} = \frac{WS}{1 + 0.23 \log \frac{12 - TL}{10}} \quad (14)$$

$$U_* = 0.04 U_{10} \quad (15)$$

7. 摘 要

有明海に設置されている佐賀大学海象観測装置によって得られた波浪データを統計的に解析し、浅海域における表面波形の変動特性を検討した。その結果、次のようなことが明らかになった。

1) 波形の度数分布は正規分布に近い形を示すが、そのひずみ度 C_s と尖鋭度 C_k の平均値と標準偏差は

$$C_s = 0.280 \pm 0.098, \quad C_k = 3.184 \pm 0.309$$

となる。また、 C_s と C_k の関係は次式で示される。

$$C_k = 2.141 C_s + 2.585 \quad (\gamma = 0.680)$$

2) 波形のスペクトル解析の結果、風速あるいは水深の増加につれてスペクトル密度曲線のピーク値が増大し、かつピークが低周波側へ移行する。また、高周波側においては、 $\beta' = \phi(f) f^5 / g^2$ の平均値は 5.07×10^{-6} となる。さらに、低周波側では、次の関係が存在する。

$$\log(\phi(f) f^5 / g^2) = -13.07 + 7.52(gF/U_*^2)^{0.321} (U_* f / g)$$

参 考 文 献

- 1) 土木学会編 (1971). 水理公式集. 土木学会. 578.
- 2) 合田良実 (1975). 波浪の統計的性質とその応用. 第13回水工学に関する夏期研修会講義集. B-1. 1-21.
- 3) 合田良実・永井康平 (1974). 波浪の統計的性質に関する調査・解析. 港湾技術研究所報告. 13. 1-37.
- 4) 日野幹雄 (1978). スペクトル解析. 朝倉書店. 東京. p.115-118.
- 5) 井島武士 (1970). 海岸工学. 朝倉書店. 東京. p.282-283.
- 6) 光易 恒 (1968). 博多湾の風と波. 第15回海岸工学講演会講演集. 58-64.
- 7) 光易 恒 (1970). 風波スペクトルの発達(2). 第17回海岸工学講演会講演集. 1-7.
- 8) 光易 恒・中山竜三 (1969). 風波のスペクトルの発達. 第16回海岸工学講演会講演集. 53-58.